Journal of Agricultural Machinery

Homepage: https://jame.um.ac.ir

Research Article
Vol. 13, No. 3, 2023, p. 249-266

Modeling and Fabrication of a Robot for Sowing in a Seedling Tray (Case Study: Sugar Beet)

S. Abdanan Mehdizadeh[1*]

1- Mechanics of Biosystems Engineering Department, Faculty of Agricultural Engineering and Rural Development, Agricultural Sciences and Natural Resources University of Khuzestan, Ahvaz, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.abdanan@asnrukh.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.74055.1080

Received: 07 December 2021 Revised: 13 January 2022 Accepted: 18 January 2022 Available Online: 18 January 2022	**How to cite this article:** Abdanan Mehdizadeh, S. (2023). Modeling and Fabrication of a Robot for Sowing in a Seedling Tray (Case Study: Sugar Beet). *Journal of Agricultural Machinery, 13*(3), 249-266. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jam.2022.74055.1080

Introduction

Adopting new technologies for crop growth has the characteristics of improving disaster resistance and stress tolerance, ensuring stable yields, and improving product quality. Currently, the cultivation of seed trays relies on huge labor power, and further mechanization is needed to increase production. However, there are some problems in this operation, such as the difficulty of improving the speed of a single machine, seedling deficiency detection, automatic planting, and controlling the quality, which need to be solved urgently. To solve these problems, there are already some meaningful attempts. Si *et al.* (2012) applied a photoelectric sensor to a vegetable transplanter, which can measure the distance between seedlings and the movement speed of seedlings in a seedling guide tube, to prevent omission transplantation. Yang *et al.* (2018) designed a seedling separation device with reciprocating movement of the seedling cup for rice transplanting. Tests show that the structure of the mechanical parts of the seedling separation device meets the requirements of seed movement. The optimization of the control system can improve the positioning accuracy according to requirements and achieve the purpose of automatic seedling division. Chen *et al.* (2020) designed and tested of soft-pot-tray automatic embedding system for a light-economical pot seedling nursery machine. The experimental results showed that the embedded-hard-tray automatic lowering mechanism was reliable and stable as the tray placement success rate was greater than 99%. The successful tray embedding rate was 100% and the seed exposure rate was less than 1% with a linear velocity of the conveyor belt of 0.92 m s^{-1}. The experiment findings agreed well with the analytical results.

Despite the sharp decline in Iran's water resources and growing population, the need to produce food and agricultural products is greater than ever. In the past, most seeds were planted directly into the soil, and many water resources, especially groundwater, were used for direct seed sowing and plant germination. One way to reduce the consumption of water, fertilizers, and pesticides is to plant seedlings instead of direct seed sowing. Therefore, the purpose of this study was dynamic modeling and fabrication of seed planting systems in seedling trays.

Material and Methods

In this experiment, Flores sugar beet seeds (Maribo company, Denmark) were used. The seedling trays had dimensions of 29.5*60 cm with openings and holes of 5.5 and 4 cm, respectively. To plant seeds in seedling trays, first, a planter arm was modeled and its position was obtained at any time. Then, based on dynamic modeling, the arm was constructed and a capacitive proximity sensor (CR30-15AC, China) and IR infrared proximity sensor (E18-D80NK, China) were used to find the location of seedling trays on the input conveyor and position of discharging arm, respectively. To achieve a stable and effective control system, a micro-controller-based circuit was developed to signal the planting system. The seed planting operation was performed in the seedling tray according to the coordinates which were provided through the image processing method. The planting system was evaluated at two levels of forward speed (5 and 10 cm s^{-1}). Moreover, a smartphone program was implemented to monitor the operation of the planting system.

Results and Discussion

The planting system was assessed for sugar beet seeds using two levels of forward speed (5 and 10 cm s^{-1}). The nominal capacity of this planter ranged from 3579 to 4613 cells per hour, with a miss and multiple implantation indices of 0.03% and 8.17%, respectively, in 3000 cells. Due to its planting accuracy, speed, and low energy consumption (25.56 watt-hours), this system has the potential to replace manual seeding in seedling trays.

Conclusion

In the present study, a seed-sowing system for planting seedling trays was designed, constructed, and evaluated based on dynamic modeling. In the developed system, unlike previous research, planting location detection was conducted through image processing. Additionally, a smartphone program was established to monitor the operation of the planting system without interfering with its performance. This study demonstrates that image processing can successfully detect planting locations and can effectively improve efficiency over time for major producers.

Keywords: Image processing, Modeling, Planter system, Seedling tray

نشریه ماشین‌های کشاورزی
https://jame.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۱۳، شماره ۳، پاییز ۱٤٠۲، ص ۲٦٦-۲٤۹

مدل‌سازی و ساخت ربات کارنده بذر در سینی نشاء (مطالعه موردی: چغندرقند)

سامان آبدانان مهدی زاده[1*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۹/۱۶
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۲۸

چکیده

با وجود کاهش شدید منابع آبی ایران و رشد روزافزون جمعیت، نیاز به تولید غذا و محصولات کشاورزی بیش از گذشته است. در گذشته، اغلب کاشت گیاهان به‌صورت کشت مستقیم بذر صورت می‌پذیرفت و منابع آبی بسیار خصوصا آب‌های زیرزمینی برای کشت مستقیم بذر و جوانه‌زنی گیاه مصرف می‌شد. از جمله روش‌های کاهش مصرف آب، کود و سموم کشت نشایی به‌جای کشت مستقیم بذر است. لذا هدف از پژوهش حاضر مدل‌سازی دینامیکی و ساخت سامانه کاشت بذر در سینی نشاء در نظر گرفته شد. بدین منظور ابتدا یک بازوی کارنده مدل‌سازی و موقعیت کارنده در هر لحظه به‌دست آمد. سپس براساس مدل‌سازی دینامیکی بازو ساخته و عملیات کشت بذر در سینی نشاء صورت پذیرفت. ارزیابی سامانه کاشت دو سطح سرعت پیشروی ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه برای بذر چغندرقند انجام گرفت که ظرفیت نامی این بذرکار بین ۳۵۷۹ تا ۴۶۱۳ سلول در ساعت بود. در ضمن شاخص‌های نکاشت و چندگانه کاشت در ۳۰۰۰ سلول نیز به‌ترتیب ۰/۰۳ و ۸/۱۷ درصد به‌دست آمد. با توجه به دقت کاشت، سرعت عملکرد کارنده و همچنین مصرف اندک انرژی (۲۵/۵۶ وات‌ساعت) این سامانه توانایی جایگزینی بذرکاری دستی در سینی نشاء را دارد.

واژه‌های کلیدی: پردازش تصویر، چغندرقند، سامانه کارنده، سینی نشاء، مدل‌سازی

مقدمه

چغندرقند با نام علمی (*Beta vulgaris* L.) یکی از محصولات زراعی و استراتژیک صنعتی است که سهم عمده‌ای از تولید شکر در جهان را دارد. نیاز روزافزون کشور به تولید شکر و تأمین حدود ۷۰ درصد تولید داخلی شکر از چغندرقند، اهمیت اقتصادی این محصول را به‌خوبی نشان می‌دهد. این محصول به‌طور مستقیم (ازطریق تولید قند و شکر) و به‌صورت غیرمستقیم (ازطریق تأمین خوراک دام) بخشی از نیازهای کشور را برآورده می‌سازد. طول دوره رشد برای تولید قند ۶ تا ۹ ماه می‌باشد (Biancardi *et al.*, 2010). افزون بر این از ملاس که از فرآورده‌های فرعی چغندرقند به‌شمار می‌آید در صنعت الکل‌سازی و داروسازی استفاده می‌شود. براساس آمار رسمی فائو[2] سطح زیرکشت چغندرقند در جهان حدود ۵/۰۳ میلیون هکتار با عملکرد متوسط حدود ۴۸/۶ تن در هکتار می‌باشد که سهم ایران در بین کشورهای جهان، حدود ۸۷ هزار هکتار سطح زیرکشت و با عملکرد حدود ۵۹ تن در هکتار است (FAO, 2018). در مناطق دارای محدودیت طول دورهٔ رشد و دارای منابع آب و خاک به نسبت شور با اطمینان ۹۹ درصد کشت نشائی بهتر از کشت مستقیم بذر است؛ لذا چغندرقند نیز از این قاعده مستثنی نمی‌باشد (Keyvanlo & Armin, 2017). در پژوهشی کشت گلدانی چغندرقند با کشت مستقیم آن از نظر عملکرد ریشه و شکر تولیدی با یکدیگر مقایسه گردیدند. در کشت مستقیم درصد قند ۱۸/۷۹ به‌دست آمد درحالی‌که میزان قند تولیدی در کشت گلدانی ۱۷/۳۲ درصد بود. اگرچه در کشت گلدانی درصد قند تولیدی کمتر بود اما بالاتر بودن عملکرد ریشه در این روش سبب افزایش عملکرد شکر تولیدی شد (Nasri, Kashani, Sadeghian Motahar, & Habibi, 2011).

با توسعه اتوماسیون در سامانه‌های کشاورزی، سطح اقتصادی کشاورزی نیز به‌تدریج افزایش یافته است. عملکرد اقتصادی مناسب در محصولات زراعی و گلخانه‌ای تابع رشد رویشی مناسب در اوایل فصل رشد و توزیع و تخصیص مناسب مواد فتوسنتزی به ریشه است، در نتیجه کشت به‌موقع گیاهان از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. تسریع در رشد گیاه را می‌توان در شرایط کنترل‌شده به کمک کشت

۱- گروه مکانیک بیوسیستم، دانشکده مهندسی زراعی و عمران روستایی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: s.abdanan@asnrukh.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jam.2022.74055.1080
2- FAO

در خزانه و انتقال آن به زمین اصلی در زمان مناسب که خطر سرمای زمستانه و همچنین مشکل کمبود آب برطرف شده، میسر نمود (Cao, 2019). لذا بسیاری از صنایع با توجه به این نیاز روزافزون تولید دستگاه‌های کشت و همچنین کاهش زمان و نیاز نیروی کار، به‌طور پیوسته اقدام به تولید سامانه‌های خودکار تولید و کاشت نشاء نموده‌اند (Tian *et al.*, 2017). تا به امروز پژوهش عمده‌ای در زمینه ساخت و تولید دستگاه‌های خودکار تولید نشاء صورت نگرفته و فرآیند تولید نشاء به‌صورت دستی در کشور انجام می‌شود. این در حالی است که شدت کار بالاتر و راندمان پایین این عمل به‌صورت دستی، تولید در مقیاس بزرگ را دشوار می‌نماید.

بر اساس گزارش‌های موجود، توسعه دستگاه‌های مکانیزه تولید نشاء درکشورهای آمریکا و ژاپن در دهه ۱۹۸۰ شروع گردید. دستگاه‌های توسعه‌یافته شامل دستگاه‌های تولید و کشت در سینی نشاء (Si *et al.*, 2013; Rosli *et al.*, 2016)، سامانه کشت نشاء در گلدان (Yang *et al.*, 2018) و دستگاه‌های کشت نشاء در مزرعه (Wang *et al.*, 2018) می‌باشند. ازجمله پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه کارنده‌ها می‌توان به بهینه‌سازی ساختار بخش کارنده نشاء که مهم‌ترین بخش دستگاه می‌باشد با روش بهینه‌سازی هدایت‌شده به‌وسیله تصحیح پارامترها[1] برای ایجاد مدل اصلاح‌شده اشاره نمود. حاصل این کار پژوهشی، نرم‌افزاری با قابلیت مدل‌سازی انواع مختلف نشاکار و بهینه‌سازی آن‌ها با توجه به شرایط کاری مختلف دستگاه بود (Yun *et al.*, 2011). در مطالعه‌ای، بازویی به‌منظور جمع‌آوری نشاء از سینی نشاء طراحی و ساخته شد. در این پژوهش، ابتدا مدل‌سازی دینامیکی بازوی گیرنده نشاء انجام و براساس نتایج این مدل‌سازی، بازوی گیرنده تولید گردید (Li *et al.*, 2019). در پژوهشی دیگر از یک سامانه کنترلی بر پایه PLC به‌منظور نیمه‌خودکارسازی دستگاه کارنده نشاء استفاده گردید. سامانه توسعه‌یافته علاوه بر کنترل حرکت سینی نشاء و جداسازی نشاءها به‌صورت خودکار ازطریق ارسال سیگنال فرمان به شیربرقی و موتور کارنده، امکان کنترل از راه دور و به‌صورت بی‌سیم را دارا بود. براساس نتایج، موفقیت سامانه در کاشت در سرعت‌های متفاوت ۴۰، ۵۰ و ۶۰ گیاه در دقیقه به‌ترتیب ۹۸/۶، ۹۷/۲ و ۹۶/۵ درصد به‌دست آمد (Yang *et al.*, 2020). تعیین دقت کاشت نشاء نیز از مسائل مهم می‌باشد. در پژوهشی از تکنولوژی پردازش تصویر و اطلاعات فازی به‌منظور تعیین سلامت نشاء استفاده گردید. براساس نتایج، دقت تشخیص نشاء در سرعت انتقال ۷۰ نشاء در دقیقه، ۹۷/۳۳ درصد به‌دست آمد (Jin *et al.*, 2020).

تولید نشاء، کاری زمان‌بر، طاقت‌فرسا و با کار کارگری بسیار است. بر این اساس یک کارنده نئوماتیک برای کاشت بذور ریز در سینی نشاء طراحی و ساخته شد. بر اساس نتایج، دقت کاشت تک بذر دستگاه کارنده برای بذرهای گوجه و فلفل دلمه‌ای ۹۰ درصد به‌دست آمد. به‌علاوه مطابق با اندازه سینی مورد استفاده، ظرفیت معادل دستگاه ۳۸۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ سلول در ساعت بود (Gaikwad & Sirohi, 2008). در پژوهشی دیگر مطالعه اولیه به‌منظور طراحی و ساخت یک ربات بذرکار دقیق برای کاشت بذر گوجه‌فرنگی در سینی‌های کاشت انجام پذیرفت. این بذرکار در فشار مکش ۳/۸۹ و ۳/۴۲ بار و قطر سوراخ‌های ۰/۴۷ و ۰/۴۹ میلی‌متر مورد ارزیابی قرار گرفت و بسته به اندازه سینی‌ها، ظرفیت نامی این بذرکار بین ۱۷۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ سلول در ساعت گزارش گردید (Gezavati *et al.*, 2014). در پژوهشی به طراحی و ساخت سامانه‌ای براساس میکروکنترلر AVR برای کشت بذر در سینی- نشا- نرم[2] پرداختند. در سامانه توسعه‌یافته، سینی‌های نشاء به کمک موتور DC به محل کاشت منتقل می‌شدند و فرآیند کاشت به‌صورت خودکار انجام می‌گردید. مطابق با نتایج، قابلیت اعتماد سامانه -بیشتر از ۹۹ درصد (در سرعت حرکت ۰/۹۲ متر بر ثانیه) گزارش شد (Chen *et al.*, 2020).

انرژی ورودی و هزینه کارگری تولید و کشت نشاء نسبت به کشت مستقیم بیشتر بوده و این در صورتی است که حذف کار کارگری در هر بخش می‌تواند صرفه اقتصادی این نوع کشت را به‌صورت چشم‌گیری افزایش دهد. لذا هدف از این پژوهش، مدل‌سازی و طراحی بازوی کشت بذر در سینی نشاء در نظر گرفته شد. بدین منظور ابتدا مدل ریاضی بازو در ابعاد مختلف و سرعت‌های حرکتی مختلف سینی نشاء به‌دست آمد؛ سپس بر اساس مدل‌سازی صورت گرفته، عملیات کاشت در سینی نشاء با کمک پردازش تصاویر دیجیتال انجام پذیرفت.

مواد و روش‌ها

تهیه نمونه و سینی کشت

در این آزمایش از بذر چغندرقند فلورس (شرکت Maribo، کشور دانمارک) استفاده شد. سینی‌های کشت مورد استفاده از مواد تجدیدپذیر و دارای ابعاد ۶۰×۲۹/۵ سانتی‌متر و دارای ابعاد دهانه و حفره به‌ترتیب ۵/۵ و ۴ سانتی‌متر بود.

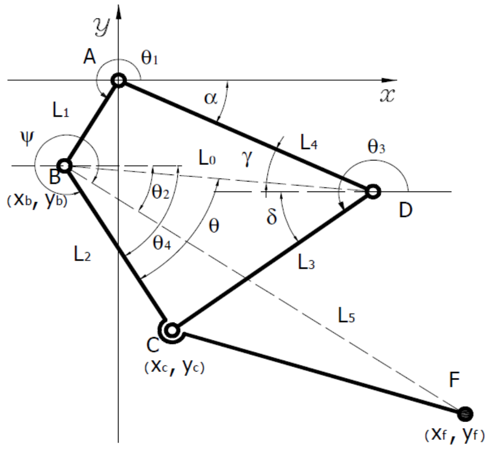
مدل سازی ریاضی سامانه کارنده

مکانیزم بازو کارنده بذر به‌صورت شماتیک در شکل ۱ آمده است. در این شکل AB محور لنگ، BCF میله کارنده، DC و AD میله‌های رابط هستند. طول AB، BCF، DC، AD و زاویه بین آن‌ها و محور x به‌ترتیب L_1، L_2، L_3، L_4 و θ_1، θ_2، θ_3 و α می‌باشد.

1- Optimization guided by parameters' modification

2- Soft-pot-tray

به‌منظور تحلیل دینامیکی حرکت محور لنگ، جهت عقربه ساعت و سرعت دورانی w_1 در نظر گرفته شدند. این سامانه بر اساس معیار کورتز–باخ دارای دو درجه آزادی است؛ درنتیجه برای حرکت، به دو موتور نیاز دارد که در بخش بعدی به نحوه انتخاب آن پرداخته می‌شود.



شکل ۱– شماتیک مکانیزم بازو کارنده بذر

Fig.1. Schematic of seed planting arm mechanism

به‌منظور انجام مدل‌سازی مکانیزم کارنده هر میله در محور x و y تصویر شدند (روابط ۱– ۴).

$$\begin{cases} x_f = l_1\cos(\theta_1)+l_5\cos(\theta_2) \\ y_f = l_1\sin(\theta_1)+l_5\sin(\theta_2) \end{cases} \quad (۱)$$

$$\theta_2 = \theta-\gamma+\alpha-\psi \quad (۲)$$

$$\theta = \cos^{-1}\left(\frac{l_0^{\,2}+l_2^{\,2}-l_3^{\,2}}{2l_0l_2}\right) \quad (۳)$$

$$\gamma = \cos^{-1}\left(\frac{l_4^{\,2}+l_0^{\,2}-l_1^{\,2}}{2l_0l_4}\right) \quad (۴)$$

طبق رابطه (۱) مختصات نقطه $f(x_f, y_f)$ در شرایطی که طول میله، زاویه اتصال و زاویه میله به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند، قابل‌محاسبه است. در حالی که مقدار زاویه میله ثابت باشد، مسیر حرکت میله کارنده همان مختصات نقطه f است. در رابطه (۳) و (۴) $l_0=\sqrt{l_1^{\,2}+l_4^{\,2}-2l_1l_4\cos(\theta_1+\alpha)}$ و اندازه محور BD می‌باشد. با توجه به شکل ۱ زاویه بین لنگ و اسبک از روابط (۵) و (۶) قابل‌محاسبه است.

$$\theta_3 = \pi-\alpha+\gamma+\delta \quad (۵)$$

$$\delta = \cos^{-1}\left(\frac{l_0^{\,2}-l_2^{\,2}+l_3^{\,2}}{2l_0l_3}\right) \quad (۶)$$

با توجه به روابط (۲) و (۵) زاویه بین محور لنگ و میل رابط DC در هر لحظه با اختیار مقدار تصادفی برای θ_1 قابل‌محاسبه می‌باشد. از طرف دیگر اگر سرعت زاویه‌ای محور لنگ w_1 نسبت به رابط DC و AD مشخص باشد، سرعت زاویه‌ای و شتاب زاویه‌ای آن‌ها با استفاده از روش بردار مختلط به‌دست می‌آید. این مکانیزم محور لنگ و میل رابط DC را می‌توان به‌عنوان یک ABCD چند ضلعی بسته در نظر گرفت؛ در نتیجه در فضای مختلط رابطه (۷) میان ۴ بازو برقرار است (Wang & Feng, 2013):

$$l_1e^{j\theta_1}+l_2e^{j\theta_4}+l_3e^{j\theta_3}+l_4e^{j\alpha}=0 \quad (۷)$$

با بسط رابطه (۷) می‌توان آن را به‌صورت توابعی مطابق روابط (۸) و (۹) تعریف نمود (Li-zhang & Yao-ming, 2007).

$$g_1 = l_1\cos(\theta_1)+l_2\cos(\theta_4)+l_3\cos(\theta_3)-l_4\cos(\alpha)=0 \quad (۸)$$

$$g_2 = l_1\sin(\theta_1)+l_2\sin(\theta_4)+l_3\sin(\theta_3)-l_4\sin(\alpha)=0 \quad (۹)$$

دو رابطه بیان شده در بالا دو معادله غیرخطی برحسب θ_3، θ_4 می‌باشند. در این پژوهش به‌منظور حل این دو معادله از روش نیوتن–رافسون استفاده گردید (Chapra, 2012). به‌منظور انجام حل عددی حالت خاصی از روابط (۹) و (۱۰) که $\alpha=0$ و $\theta_1=\frac{2\pi}{3}$ را برای شرایط اولیه حرکت در نظر گرفته و روابط به‌صورت روابط (۱۰) و (۱۱) بازنویسی گردیدند:

$$\theta_3^{\,i+1}-\theta_3^{\,i} = \frac{g_1\cos(\theta_4)+g_2\sin(\theta_4)}{l_2\sin(\theta_3-\theta_4)} \quad (۱۰)$$

$$\theta_4^{\,i+1}-\theta_4^{\,i} = \frac{g_1\cos(\theta_3)+g_2\sin(\theta_3)}{l_3\sin(\theta_4-\theta_3)} \quad (۱۱)$$

که در این رابطه‌ها اندیس‌های i و i+1 مربوط به مرتبه تکرار می‌باشد. برای حل این معادلات نیاز به مقادیر اولیه θ۳، θ۴ می‌باشد. بدین منظور $\theta_4=\theta$ و $\theta_3=\theta+\pi+\delta$ در نظر گرفته شد که مقادیر θ و δ به‌ترتیب از رابطه‌های (۳) و (۶) به‌دست می‌آیند. در هر تکرار مقدار ۱ درجه به مقادیر اضافه می‌شود و مقدار به‌دست‌آمده در هر تکرار به جای زاویه قبل قرار داده می‌شود تا مسیر حرکت کارنده در ۳۶۰ درجه حرکتش به‌دست آید. بعد از تعیین موقعیت بازوها سرعت زاویه‌ای آن‌ها نیز تعیین گردید (رابطه (۱۲) و (۱۳)):

$$\omega_2=-\omega_1\frac{l_1\sin(\theta_1-\theta_3)}{l_2\sin(\theta_4-\theta_3)} \quad (۱۲)$$

$$\omega_3=\omega_1\frac{l_1\sin(\theta_1-\theta_4)}{l_3\sin(\theta_3-\theta_4)} \quad (۱۳)$$

به‌علاوه با مشتق‌گیری از روابط (۱۲) و (۱۳) بر حسب زمان شتاب زاویه‌ای نیز محاسبه شد (رابطه (۱۴) و (۱۵)):

$$\alpha_2=\frac{l_3\omega_3^2-l_1\omega_1^2\cos(\theta_1-\theta_3)-l_2\omega_2^2\cos(\theta_4-\theta_3)}{l_2\sin(\theta_4-\theta_3)} \quad (۱۴)$$

$$\alpha_3=\frac{l_2\omega_2^2-l_1\omega_1^2\cos(\theta_1-\theta_4)-l_3\omega_3^2\cos(\theta_3-\theta_4)}{l_3\sin(\theta_3-\theta_4)} \quad (۱۵)$$

به‌منظور محاسبه گشتاور محرک و نیروهای دینامیکی وارد به سامانه کارنده به‌طور مستقل چرخش پیوندها کنترل شدند. سپس جمع نیروها ($\sum F=ma$) و ممان‌ها ($\sum M=I\alpha$) برای هر پیوند محاسبه گردید. با بسط روابط در مختصات x و y حالت ماتریسی نشان داده‌شده در رابطه (۱۶) حاصل شد.

$$\begin{pmatrix}
0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\
0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1\\
1 & \frac{l_1\sin(\theta_1)}{2} & \frac{-l_1\cos(\theta_1)}{2} & \frac{l_2\sin(\theta_4)}{2} & \frac{-l_2\cos(\theta_4)}{2} & 0 & 0 & \frac{l_4\sin(\alpha)}{2} & \frac{-l_4\cos(\alpha)}{2}\\
0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & \frac{-l_2\sin(\theta_4)}{2} & \frac{l_2\cos(\theta_4)}{2} & \frac{l_3\sin(\theta_3)}{2} & \frac{-l_3\cos(\theta_3)}{2} & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1\\
0 & 0 & 0 & \frac{-l_2\sin(\theta_4)}{2} & \frac{l_2\cos(\theta_4)}{2} & 0 & 0 & \frac{-l_4\sin(\alpha)}{2} & \frac{l_4\cos(\alpha)}{2}
\end{pmatrix}
\begin{pmatrix} T\\ F_{l_1x}\\ F_{l_1y}\\ F_{l_2x}\\ F_{l_2y}\\ F_{l_3x}\\ F_{l_3y}\\ F_{l_4x}\\ F_{l_4y}\end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
m_1a_{1x}+m_4a_{4x}\\
m_1a_{1y}+m_4a_{4y}\\
(I_1+I_4)\ddot{\theta}_1\\
m_2a_{2x}-F_{Cx}\\
-F_{Cy}+m_1a_{2y}\\
I_2\ddot{\theta}_4-F_{Cy}\frac{L_f\cos(\psi)}{2}+F_{Cx}\frac{L_f\sin(\psi)}{2}\\
m_3a_{3x}+F_{Cx}\\
m_3a_{3y}+F_{Cx}\\
I_3\ddot{\theta}_3-F_{Cy}\frac{L_f\cos(\psi)}{2}+F_{Cx}\frac{L_f\sin(\psi)}{2}
\end{pmatrix} \quad (۱۶)$$

که در این رابطه T، F_{l_ix}، F_{l_iy}، mᵢ، Iᵢ، a_{ix} و a_{iy} به‌ترتیب گشتاور محرک (N-m)، نیروی وارد به میله i ام در راستای x در محل پین (N)، نیروی وارد به میله i ام در راستای y در محل پین (N)، جرم میله i ام (kg)، ممان جرمی میله i ام (kgm^2)، شتاب وارد به میله i ام در راستای x (ms^{-2}) و نیروی وارد به میله i ام در راستای y (ms^{-2}).

به‌منظور مدل‌سازی و تعیین مسیر حرکت با توجه به ابعاد سینی نشاء مورد استفاده بدین شکل فرض شد که طول بلندترین اتصال نباید بیشتر از ۵۰ برابر طول کوتاه‌ترین اتصال باشد. شایان ذکر است در این طراحی طول بازوی CF نیز از ۱ تا ۲۵ واحد تغییر می‌نمود. از آن‌جا که نسبت طول اتصال در نحوه حرکت مکانیزم کارنده تاثیرگذار است طول L_1، ۱ واحد در نظر گرفته شد و برای طول L_3 و L_4 امکان تغییر در محدوده ۱ تا ۵۰ واحد فراهم گردید. ماکزیمم طول L_2 با توجه به ۲ شرط موجود در رابطه (۱۷) و همچنین تئوری حرکتی گراشف[1] به‌دست می‌آید (Waldron, Kinzel, & Agrawal, 2016):

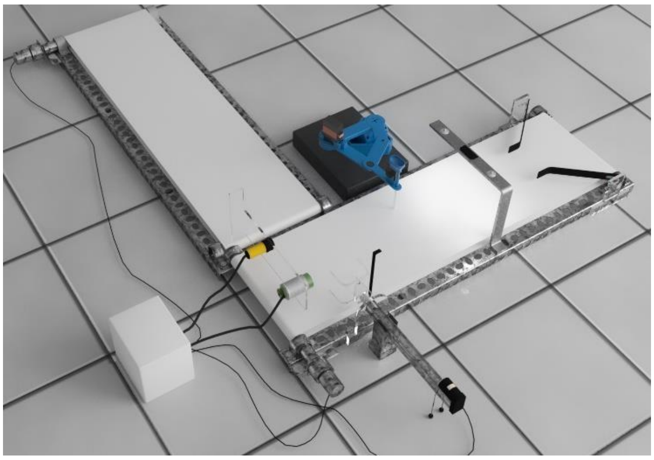
$$\begin{cases} l_2\max=l_1+l_3+l_4\\ l_2\max\le 50\end{cases} \quad (۱۷)$$

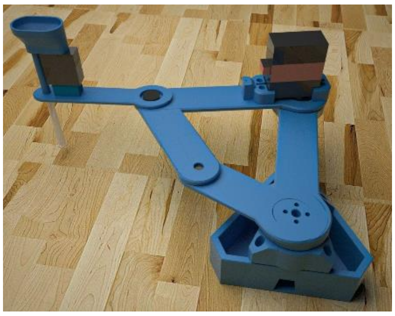
نهایتا ترکیب‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به محل سینی نشاء و حفره‌های آن بهترین ترکیب طول برای هر یک از اتصالات براساس مسیرهای مختلف حرکتی تعیین شد. به‌علاوه بعد از هر بار عکس‌برداری حرکت‌های مختلف مکانیزم مدل‌سازی‌شده و حرکت بهینه براساس زاویه چرخش سروو موتورها به مکانیزم کارنده منتقل می‌گردد.

ساخت بخش مکانیک ربات کارنده

نمایی از سامانه کارنده در شکل ۲ آمده است. به‌منظور طراحی و تعیین اندازه بازوها همان‌طور که پیش‌تر گفته شد ابتدا مسیر حرکت با ابعاد مختلف به‌دست آمد سپس براساس موقعیت کارنده و محل قرارگیری سینی نشاء بر روی تسمه نقاله، مناسب‌ترین طول تعیین گردید. شایان ذکر است که عرض تسمه نقاله مورد استفاده ۳۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد.

1- Grashof's theorem





(a) (b)

شکل ۲– سامانه کاشت بذر در سینی نشاء: a) نمای کامل؛ b) بازوی کارنده

Fig.2. Seed planting system in the seedling tray: a) Whole system; b) Planting arm

به‌منظور ساخت قطعات بعد از تعیین ابعاد مورد نظر با توجه به معیارهای طراحی نقشه طراحی استخراج و به پرینتر سه‌بعدی به‌صورت G-Codes جهت چاپ ارسال می‌شود. جنس مورد استفاده به‌منظور ساخت بازوها پلی‌لاکتیک اسید[1] یا PLA با قطر ۱/۷۵ میلی‌متر ساخت شرکت یوسو در نظر گرفته شد. PLA یک پلیمر انعطاف‌پذیر و نرم می‌باشد که از منابع تجدیدپذیر مانند نشاسته ذرت و یا نیشکر تولید می‌شود. البته امکان استفاده از جنس ABS نیز وجود داشت اما دمای ذوب پایین فیلامنت PLA نسبت به ABS چاپ قطعات پیچیده را که نیاز به مدت زمان بیشتر دارند آسان‌تر می‌سازد. طراحی و تهیه نقشه از بخش‌های مختلف سامانه در نرم افزار 3DS MAX صورت پذیرفت.

طراحی مدار الکتریکی و کنترل‌کننده سامانه کارنده

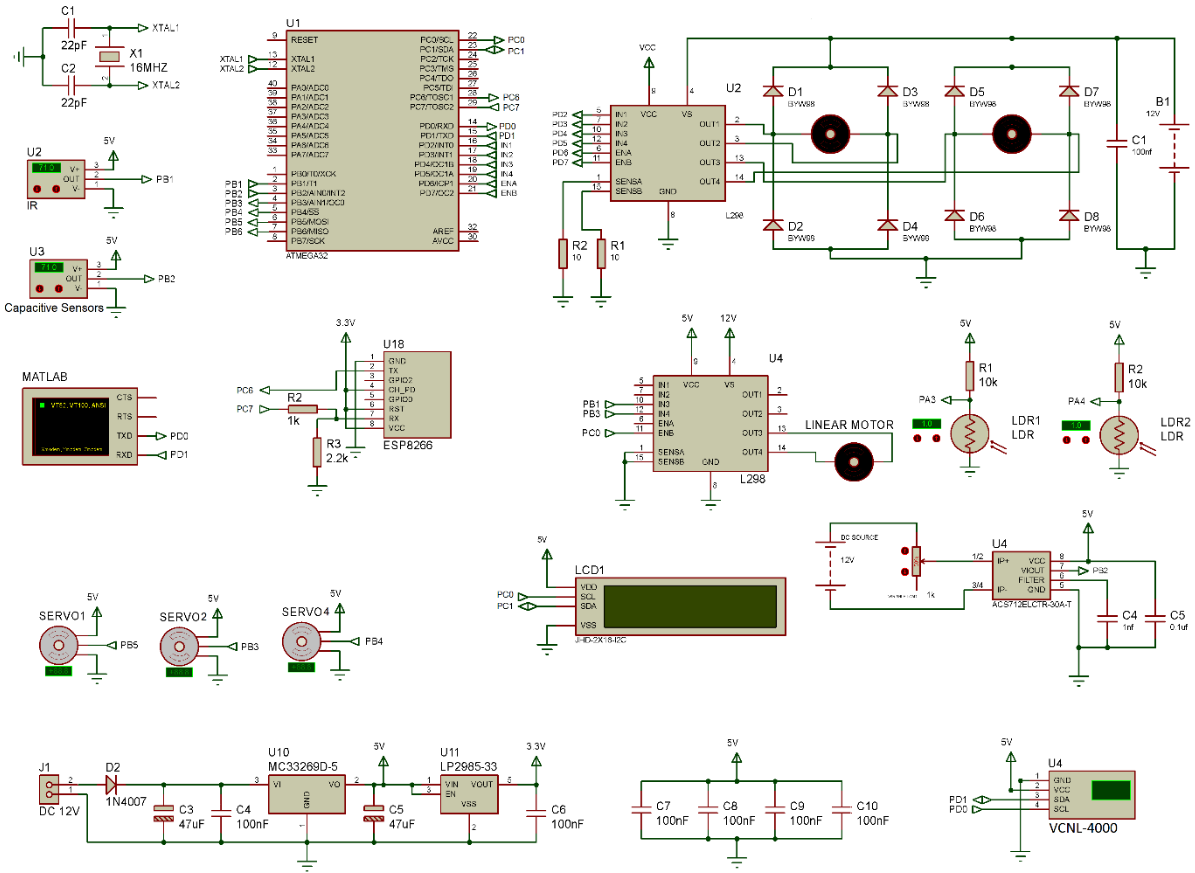
سامانه مورد نظر شامل یک میکروکنترلر ATMEGA32 به‌منظور انجام عملیات کنترلی، ماژول موتور درایور دو کاناله (مدل L298N، کشور چین) به‌منظور کنترل موتور DC تسمه نقاله و جک هیدرولیکی هدایت‌کننده سینی نشاء، سه عدد سروو موتور (دو عدد MG995، یک عدد SG90، کشور چین) برای کنترل بازوی کارنده، از سنسور مجاورتی خازنی (CR30-15AC، کشور چین) و سنسور مادون قرمز (E18-D80NK، کشور چین) به‌ترتیب به‌منظور تشخیص قرارگیری سینی در محل مناسب کاشت روی نوار نقاله ورودی و موقعیت بازوی تخلیه‌کننده، حسگر مجاورتی (مدل VCNL-4000، کشور چین) جهت شمارش تعداد بذرها، حسگر نوری جهت تشخیص پر و خالی بودن مخزن کارنده و ماژول ESP8266 برای ارسال داده‌ها به‌صورت Wi-Fi و اتصال به موبایل می‌باشد. با توجه به طراحی صورت گرفته، کاربر امکان مشاهده تعداد سینی‌های کاشته‌شده، میزان انرژی مصرفی و تعداد بذرهای کاشته‌شده را دارد. در این مطالعه از یک منبع تغذیه ۱۲ ولت ۳۰ آمپر برای تامین عنوان ولتاژ ورودی استفاده شد. به‌منظور کاهش سطح ولتاژ به ۵ و ۳/۳ ولت به‌ترتیب از MC33269D5 و LP2985 استفاده گردید. در ضمن اندازه‌گیری جریان مصرفی توسط حسگر ACS712 صورت پذیرفت (شکل ۳).

سروو موتورهای مدل MG995 امکان ایجاد دو حداکثر سرعت (۵/۲ و ۵/۵ رادیان بر ثانیه) و گشتاور (۱/۲۷ و ۱/۴۷ نیوتن–متر) با توجه به ولتاژ ورودی (۴/۸ و ۶ ولت) را داشتند. در ضمن طول پالسی (بر حسب میکرو ثانیه) که متناسب آن سروو را به زاویه ۰ و ۱۸۰ هدایت می‌نمود به‌ترتیب دارای مقدار ۵۴۴ و ۲۴۰۰ بودند. لذا در این پژوهش به‌منظور جلوگیری از آسیب احتمالی به سرووها و خطای چرخش در دو انتها، ولتاژ کاری ۴/۸ و طول پالس بین ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرو ثانیه در نظر گرفته شد. به‌علاوه سرووها در حالت بدون بار با توجه به ارسال سیگنال فرمان از میکروکنترلر در حلقه تکرار، جریانی در حدود ۱۵۰ میلی‌آمپر مصرف می‌نمودند؛ از این رو به‌منظور جلوگیری از داغ شدن سرووها و همچنین کاهش مصرف انرژی زمانی که نیازی به عملکرد بازوی کارنده وجود نداشت، اتصال سرووها به‌صورت نرم‌افزاری قطع می‌گردید.

ارزیابی سامانه کارنده

جهت ارزیابی سامانه کاشت، دو سطح سرعت پیشروی ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد. سرعت‌های ذکرشده حداقل و حداکثر سرعت چرخش موتور DC می‌باشند.

1- Polylactic Acid



شکل ۳– مدار الکتریکی سامانه کاشت بذر در سینی نشاء

Fig.3. Electrical circuit of seed sowing system in seedling tray

بـه‌منظور ایجـاد سـرعت‌هـای ذکرشـده از پایـه‌هـای PWM و مدولاسیون پهنای باند استفاده گردید. در این حالت در واقع با کنتـرل میزان پالس، ولتاژ خروجی نیز کنترل‌شده که این مسئله سـبب تولیـد سرعت‌های مختلف می‌گردد. در ضمن شاخص‌هـای نکاشـت (رابطـه ۱۸) و چندگانه کاشت (رابطه ۱۹) نیز طی فرآیند کاشت ۳۰۰۰ سـلول محاسـبه شـد (Abdolahzare & Abdanan Mehdizadeh, 2018a):

$$I_{miss} = \frac{N_1}{N} \times 100 \qquad (۱۸)$$

$$I_{mul} = \frac{N_2}{N} \times 100 \qquad (۱۹)$$

که در این روابط N_1، N_2 و N به‌ترتیب تعداد سـلول‌هـای خـالی، تعداد سلول‌های دارای بیش از یک بذر و تعداد کل سلول‌ها است.

بـه‌عـلاوه بـه‌منظـور محاسـبه انـرژی فرآینـد کاشـت از حسـگر ACS712 برای اندازه‌گیری جریان مصرفی استفاده شد. ورودی ایـن آی سی به‌صورت آنـالوگ مـی‌باشـد لـذا بـه‌منظور محاسـبه جریـان به‌صـورت زیـر عمـل گردیـد (رابطـه (۲۰) و (۲۱)) (Anonymous, 2007):

$$V = \left(\frac{V_r}{1024.0}\right)*5000 \qquad (۲۰)$$

$$Amps = \left(\frac{V}{2500}\right)*185 \qquad (۲۱)$$

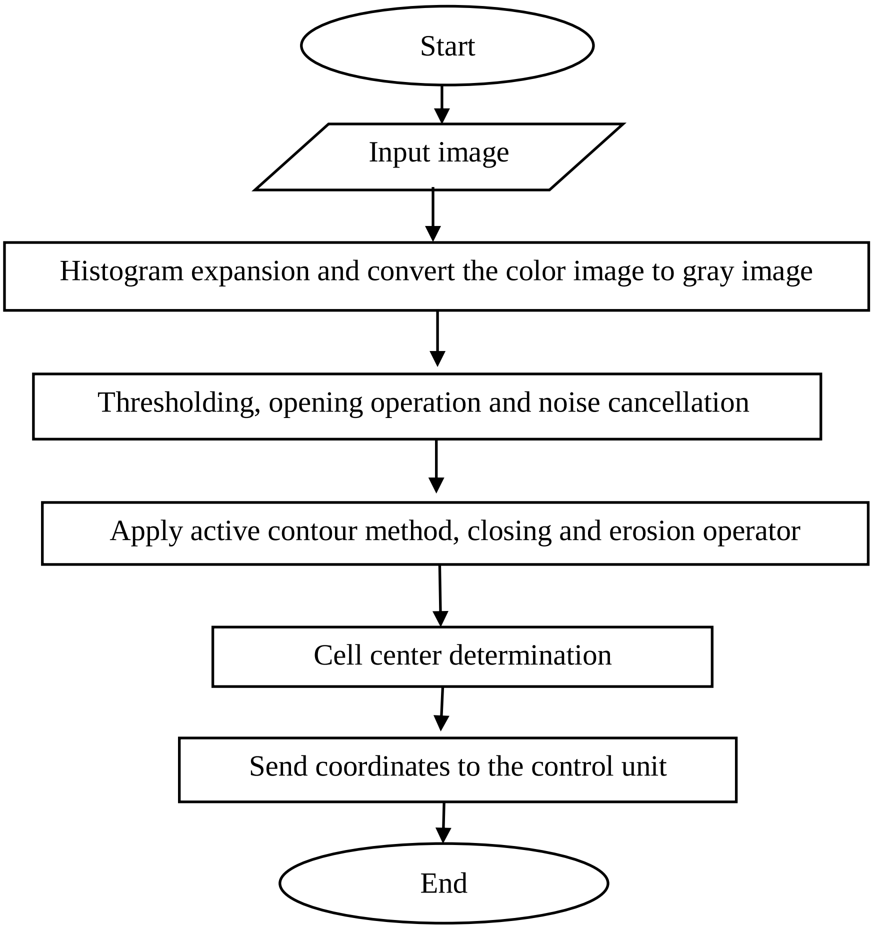
که در این روابط V ولتاژ بر حسب میلی‌ولت، V_r عدد خام ورودی به میکروکنترلر و Amps جریان مصرفی بر حسب آمپر می‌باشند. حال با داشتن پارامترهای فوق میزان انرژی (ولتاژ×جریان×زمـان) مصـرفی محاسبه گردید.

نحوه ارزیابی سامانه به‌گونه‌ای بود که در ابتدا سینی نشاء توسط کاربر بـر روی تسـمه نقالـه قـرار داده مـی‌شـد و تسـمه نقالـه بـا سـرعت‌های ثابت یاد شده، سینی نشـاء را بـه محـل کاشـت هـدایت می‌نمود. بعد از تشخیص سینی نشاء توسط حسگر IR، عکس‌بـرداری به‌منظور تعیین مختصات سلول‌ها صورت می‌گرفت. شایان ذکر است

که چگونگی قرارگیری سینی در کاشت بـذر بـرخلاف پـژوهش‌هـای مشابه (به‌عنوان مثال پژوهش (Gezavati *et al.*, 2014) با توجه بـه تعیین مختصات کاشـت اهمیتـی نداشـت. نهایتـا بـازوی کارنـده بـه محل‌های مورد نظر ارسال می‌شد و عمل کاشت صورت می‌پـذیرفت. در ادامه، حرکت سینی بر روی تسمه نقاله ادامه می‌یافت تا بـه محـل خروج (یعنی حسگر IR دوم) می‌رسید؛ در این نقطه سینی نشاء توسط بازوی هیدرولیکی به خارج هدایت می‌گردید.

هدایت بازو به محل هر سلول

الگوریتم هدایت بازوی کارنده در شکل ۴ نمایش داده شده است. به‌منظور هدایت بازو به محل کاشت ابتدا یک تصویر از سینی نشاء بـا استفاده از یک وب‌کم لاجیتک (مدل C930e، ساخت کشـور تـایوان) در شرایط نوری ثابـت اخـذ و بـه کـامپیوتر منتقـل مـی‌شـد. وب‌کـم بـه‌صـورت عمـودی و در فاصـله ثابـت ۵۰ سـانتی‌متـری از محـل عکس‌برداری میان دو عدد ال‌ای‌دی ۵۰ وات قرار داشت.



شکل ٤- فلوچارت الگوریتم پردازش تصویر و تعیین مختصات مرکز سلول‌ها

Fig.4. Flowchart of image processing algorithm and determination of cell center coordinates

به‌منظور حذف نویز و بهبود کیفیت تصـویر بعـد از اعمـال فیلتـر میانه، هیستوگرام تصویر گسترش مـی‌یافـت (Nadafzadeh *et al.*, 2018). سپس تصاویر از رنگی به سطح خاکستری تبدیل و با اعمـال آستانه (رابطه ۲۲) بخـش‌هـایی از خـاک درون هـر سـلول مشـخص گردید.

$$i_{new}(x,y)=\begin{cases}1 & i(x,y)\le 25\\ 0 & i(x,y)>25\end{cases} \qquad (۲۲)$$

که i(x,y) تصویر اصـلی و $i_{new}(x,y)$ تصـویر بـاینری حاصـل از ناحیه‌بندی می‌باشد.

بعد از آستانه‌گذاری بـه‌منظـور حـذف نـویز موجـود در تصـویر از عملگر گشودگی با آستانه ۱۵ پیکسل مربع استفاده گردید. شایان ذکر است در پژوهش حاضر اعداد آستانه با روش سـعی و خطـا بـه‌دسـت آمدند. سپس برای اتصال بخش‌های مختلف هر سلول نشاء، الگوریتم کانتور فعال[۱] بر روی بذرهای[۲] به‌دست‌آمده پیاده‌سازی گردیـد. روش کانتور فعال پروسه‌ای است که در آن پیکسل‌های با دامنه یکسـان بـا

1- Active Contour
2- Seed

یکدیگر گروهبندی می‌گردند تا یک ناحیهٔ قطعه‌بندی‌شده را شکل بدهند. قطعه‌بندی با انتخاب یک مجموعه از نقاط به نام نقاط "بذر" آغاز می‌گردد (هستهٔ اولیه مشخص‌شده با روش آستانه‌گذاری) و با الحاق نقاط مجاور هر نقطه بذر که دارای مشخصات مشابهی (دامنه مشخصی از سطح تیرگی) با آن ناحیه بذر می‌باشند، رشد ناحیه انجام می‌گردد. سپس با اعمال عملگر بستن و فرسایش ناحیه هر سلول یکنواخت گردید (Nematinia & Abdanan Mehdizadeh, 2018). نهایتا مختصات مرکز هر سلول تعیین و به واحد کنترل جهت هدایت بازو به نقطه مورد نظر ارسال شد.

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر بخش نتایج به سه زیر مجموعه تقسیم می‌شود: بخش اول شامل نتایج مربوط به پردازش تصویر؛ بخش دوم شامل نتایج طراحی بازوی کارنده و مسیر حرکت؛ بخش سوم شامل محاسبه انرژی و عملکرد بازو می‌باشد که هر بخش به تفضیل مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

تعیین مختصات مرکز سلول‌های سینی نشاء

شکل ۵–a نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده از سینی نشاء توسط سامانه تصویربرداری را نمایش می‌دهد. بعد از اعمال آستانه، اعمال عملگر گشودگی و حذف نویزهای موجود درتصویر، بذرهای اولیه هر سلول به‌منظور اعمال الگوریتم کانتور فعال و تشخیص سلول سینی نشاء تشکیل می‌شوند (شکل ۵–b).



(a)



(b)

شکل ۵– a) نمونه‌ای از تصاویر اخذ شده از سینی نشاء b) آستانه‌گذاری و تشکیل بذرهای اولیه در هر سلول

Fig.5. a) Sample image is taken from seedling tray b) Thresholding and formation of primary seeds in each cell

بعد از تعیین بذرهای اولیه، به‌منظور تعیین سلول‌های سینی نشاء، الگوریتم کانتور فعال بر روی تصاویر، پیاده‌سازی شد و بذرهای گسسته به یکدیگر متصل گردیدند (شکل ۶–a تا ۶–d). معیار توقف در این پژوهش ۲۵ تکرار در نظر گرفته شد که با سعی و خطا بهترین حالت به‌دست آمد. سپس با اعمال عملگرهای بستن (شکل ۶–e)، گشودگی و فرسایش (شکل ۶–f) سلول‌های موجود در سینی نشاء تعیین شدند. همان‌طور که در شکل ۶–f مشخص است تمامی سلول‌ها به‌خوبی تعیین شدند و این الگوریتم عملکرد قابل‌قبولی ارائه نمود.

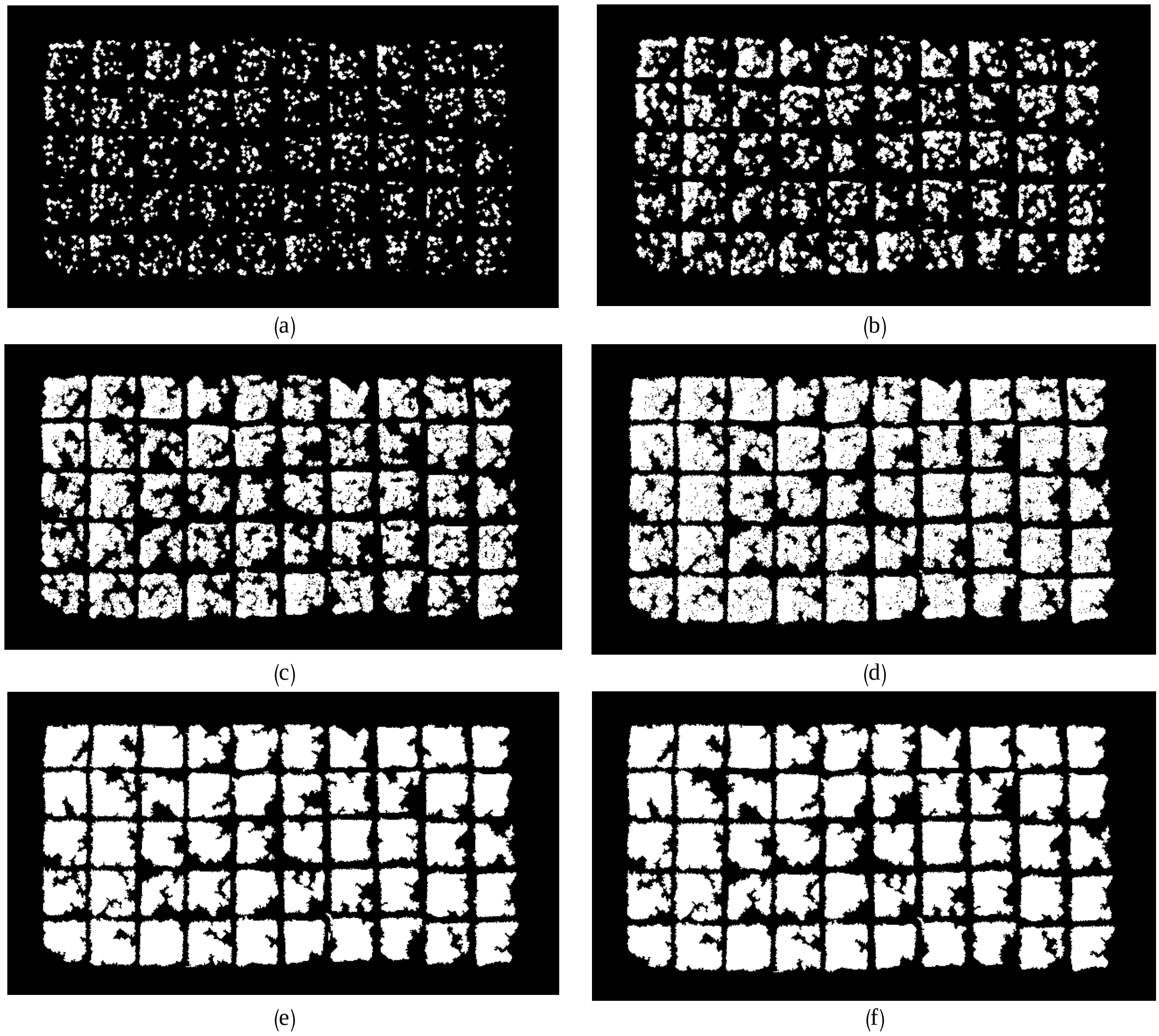
بعد از تشخیص سلول‌ها (شکل ۷–a) مرز هر ناحیه مشخص شده (شکل ۷–b) و کوچک‌ترین مستطیلی (خطوط سبز رنگ) که این مرزها را محاط می‌نمود تعیین و پیرامون آن‌ها قرار گرفت. نهایتا مرکز (ستاره‌های آبی رنگ) هر یک از این مستطیل‌ها (شکل ۷–c) به‌عنوان مختصات کاشت به برد کنترلی جهت هدایت بازوی کاشت به این مختصات‌ها و کشت بذر در نقاط مورد نظر ارسال گردید.

مطابق نتایج از ۳۰۰۰ سلول مورد بررسی، دقت تشخیص سامانه بینایی ماشین کارنده ۱۰۰ درصد به‌دست آمد. درحالی که در پژوهش (Chen *et al.*, 2020) خطای کاشت سامانه توسعه‌داده‌شده به‌صورت متوسط ۱/۵۴ درصد در سرعت ۷۰۰ سینی در ساعت گردید. این مسئله نشان از دقت بالای روش ارائه شده در پژوهش حاضر دارد.

بررسی نتایج مدلسازی دینامیکی و حرکتی بازو

دامنه مورد استفاده برای طول اتصالات از ۱/۰۰ تا ۱۰۰/۰۰ سانتی‌متر و برای زاویه اتصال از ۰ تا ۳۶۰ درجه بود و همچنین معیار گراشف به‌منظور تعیین قابلیت تحرک اتصال استفاده گردید. تعداد ترکیباتی که شرایط حرکتی گراشف و دامنه تغییراتی مورد نظر را ارضا نمودند در دور اول ۸۴ حالت به‌دست آمد؛ که با ۱۰ مقدار برای طول بازوی CF (شکل ۱) و همچنین ۱۰ مقدار برای زاویه قرارگیری آن، تعداد ترکیبات برای ابعاد بازوی کارنده ۸۴۰۰ حالت گردید. سپس آنالیز مکانیزم تا ۴ مرحله به‌صورت پیوسته با ترکیب‌های دیگر ادامه یافت. شایان ذکر است که در این مراحل دقت بررسی‌ها در محدوده تعیین‌شده افزایش یافت و در مراحل بعدی در حد صدم اعشار صورت

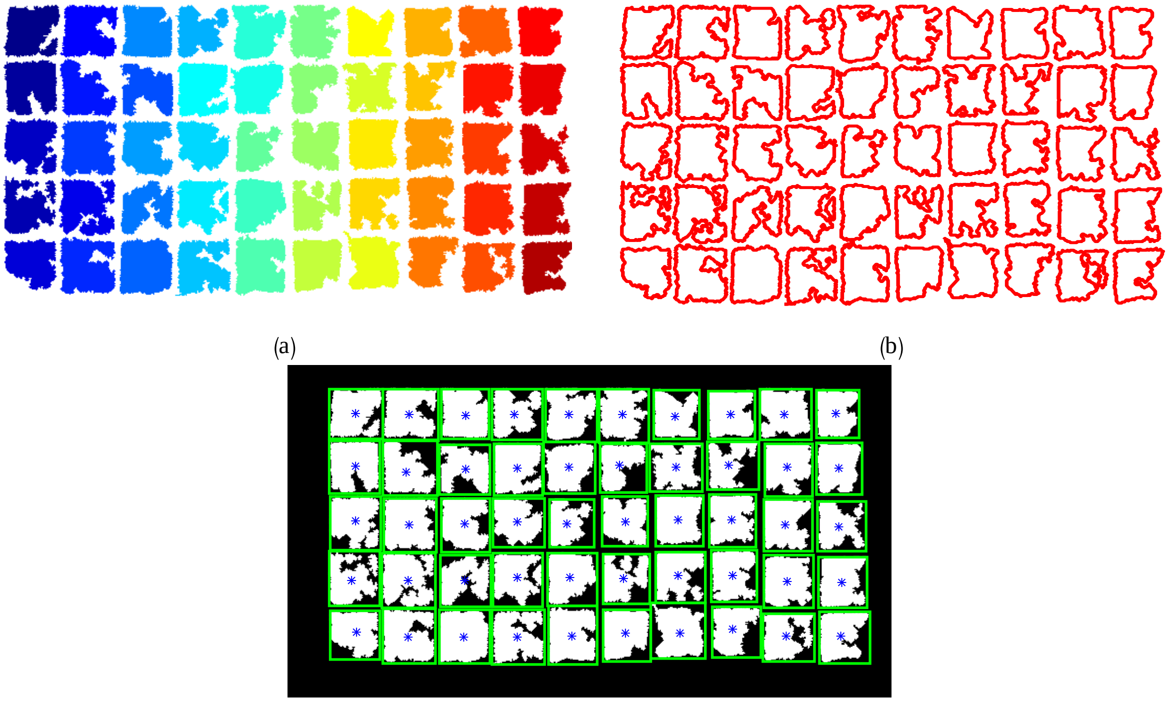
پذیرفت. البته بسیاری از ترکیبات به‌دست‌آمده در همان مراحل اولیه در بررسی‌های بصری مسیر حرکت حذف شدند. نهایتا همان‌طور که در جدول ۱ آمده است در مجموع تعداد ۲۳۰۲۱۲ ترکیب بررسی و ۶ مورد ترکیب با توجه به هزینه، ابعاد سینی‌های نشاء و کمترین حرکت ممکن برای دورترین نقاط انتخاب شدند.



شکل ٦– پیاده‌سازی الگوریتم کانتور فعال a) ۱۰ تکرار؛ b) ۱۵ تکرار؛ c) ۲۰ تکرار؛ d) ۲۵ تکرار؛ e) اعمال عملگر بستن روی تصویر خروجی از قسمت (d)؛ f) اعمال عملگر گشودگی و فرسایش روی تصویر

Fig.6. Implementation of active contour algorithm a) 10 repetitions; b) 15 repetitions; c) 20 repetitions; d) 25 repetitions; e) apply the closing operator on the output image of part (d); f) Apply the opening and erosion operator on the image

به‌منظور تعیین زاویه قرارگیری بازوی CF حالت‌های مختلفی (مطابق با جدول ۱) مورد بررسی قرار گرفتند. البته امکان مدل‌سازی هر زاویه دلخواهی در روش ارائه شده با هر ترکیب طول بازویی وجود دارد. شکل ۸ نمونه‌ای از اثر زاویه قرارگیری بازوی CF بر مسیر حرکت کارنده برای ۶ زاویه را نشان می‌دهد. در این فرآیند، مطلوب‌ترین حالت زمانی است که هنگام چرخش در یک مسیر، بیشترین پوشش در سلول‌های سینی نشاء را داشته و در ضمن مسیری دوبار طی نشود. مطابق شکل، کارنده در مسیرهای مشخص‌شده در شکل‌های (c-۸) تا (f-۸) و زوایای تعیین‌شده امکان کاشت بذر در سینی نشاء وجود دارد. در ضمن همان‌طور که گفته شد در این زوایا (یعنی ۳۱۵، ۳۲۰، ۳۳۰ و ۳۴۰ درجه) از مسیری مجدد عبور نکرده و علاوه بر این‌که انرژی مصرفی کارنده نیز صرفه‌جویی می‌گردد، امکان قفل شدن بازو نیز وجود ندارد.



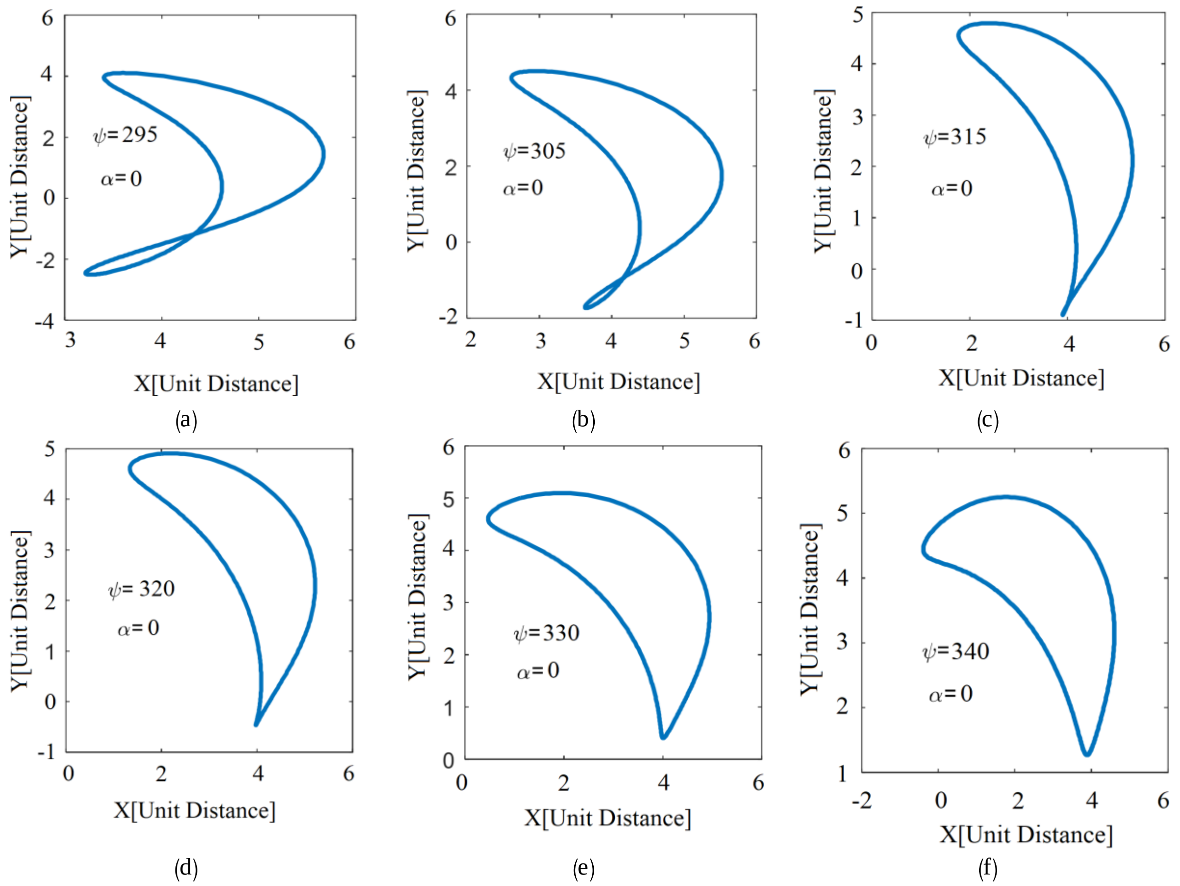
شکل ۷– a) مرز ناحیه‌های مشخص شده در قسمت بخش‌بندی تصویر؛ b) سلول‌های بخش‌بندی‌شده؛ c) مستطیل‌های محاط شده (خطوط سبز رنگ) و مراکز هر سلول (ستاره‌های آبی رنگ)

Fig.7. a) The boundaries of the areas specified in the image segmentation; b) Segmented cells; c) Enclosed rectangles (green lines) and centers of each cell (blue stars)

جدول ۱– ابعاد اتصالات به‌منظور بررسی مسیر حرکت (ابعاد طولی بر حسب سانتی‌متر و زاویه برحسب درجه می‌باشد)

Table 1- Range of the link’s dimensions for path analysis (length and angel are based on centimeter and degree, respectively)

مرحله **Stage**	دامنه تغییرات ابعاد **Range of dimensions**						تعداد ترکیبات **Combination No.**
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_f	ψ	
1	1-10	1-100	1-50	1-50	1-100	0-360	8400
	1-10	1-19.99	1-8.08	1-8.08	2.18-38.39	180-360	23500
	5-9	21-37.17	1-8.08	2.33-19.90	1-35.71	270-360, 0-120	36592
	5-9	17.11-20.53	1-8.08	8.08-50	18.80-100	300-360, 0-120	12350
2	5-8.81	48.80-57.91	1-8.08	19.90-50	10-100	330-360, 0-120	7640
	5.5-9	3.79-15.93	2.66-16.90	2.66-16.90	1-35.71	240-360, 0-30	45800
	6-9	12.35-20.53	2.66-16.90	8.08-50	3.16-100	30-140	28530
	6-9	12-18.7	8.08-50	8.08-50	1-21	300-360, 0-120	14900
3	5-8.6	13.7-20.1	2.99-4.88	2.99-4.88	12.81-18.8	300-340	7500
4	5-8.6	15.7-20.1	3.21-4.88	3.21-4.88	13.35-17.2	310-330	45000

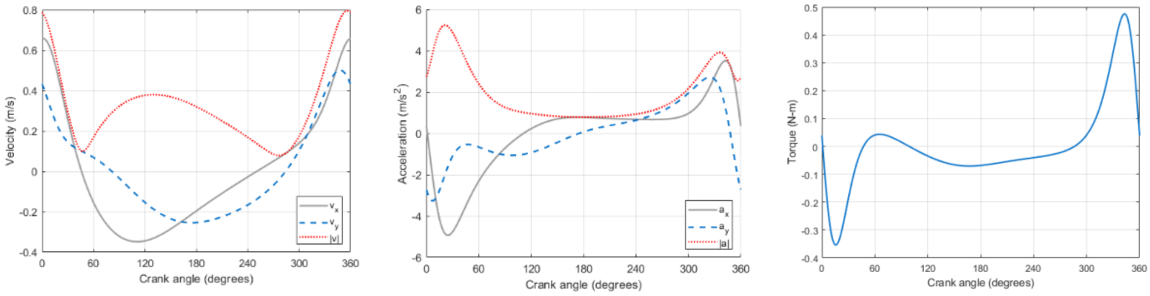


شکل ۸- مدل‌سازی اثر زاویه قرارگیری بازوی CF بر مسیر حرکت کارنده: زاویه قرارگیری a) ۲۹۵؛ b)۳۰۵؛ c) ۳۱۵؛ d) ۳۲۰؛ e) ۳۳۰؛ f) ۳۴۰ درجه

Fig.8. Modeling of the effect of CF arm position angle on the driver's travel path: position angle a) 295; b) 305; c) 315; d) 320; e) 330; f) 340 degrees

لذا پس از تعیین مختصات کاشت توسط سامانه بینایی ماشین، تمامی حالت‌های موجود حرکتی، مورد بررسی قرار گرفته و نهایتا هدایت بازو با کمترین میزان مصرف انرژی انتخاب می‌شود. بر این اساس ۸، ۱۶، ۴/۵، ۴/۵ و ۱۵ سانتی‌متر به‌ترتیب برای L_1، L_2، L_3، L_4 و L_f و ۳۲۰ درجه برای زاویه قرارگیری بازوی CF در نظر گرفته شد. شکل ۹- a تا ۹-c نمودار سرعت، شتاب و گشتاور مکانیزم طراحی‌شده با ابعاد مورد نظر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۹-b مشاهده می‌شود در بخش عمده‌ای حرکت چرخشی سامانه (۶۰-۳۱۰ درجه) شتاب حرکتی آن در حدود ۰/۹ متر بر مجذور ثانیه می‌باشد که نشان از نیروی اندک واردشده به بازوی کارنده هنگام حرکت چرخشی است. به‌علاوه بر اساس شکل ۹-c حداکثر گشتاور محرک برای سامانه کارنده ۰/۴۸ نیوتن-متر به‌دست آمد که با توجه به گشتاور موتور مورد استفاده (۱/۲۷ نیوتن-متر) مشکلی برای سامانه ایجاد نخواهد شد. این یافته با نتایج پژوهش González Mendoza *et al.* (2013) درخصوص نیاز به گشتاور محرک ناچیز برای سامانه‌های دارای جرم، سرعت و شتاب اندک در یک راستا می‌باشد.

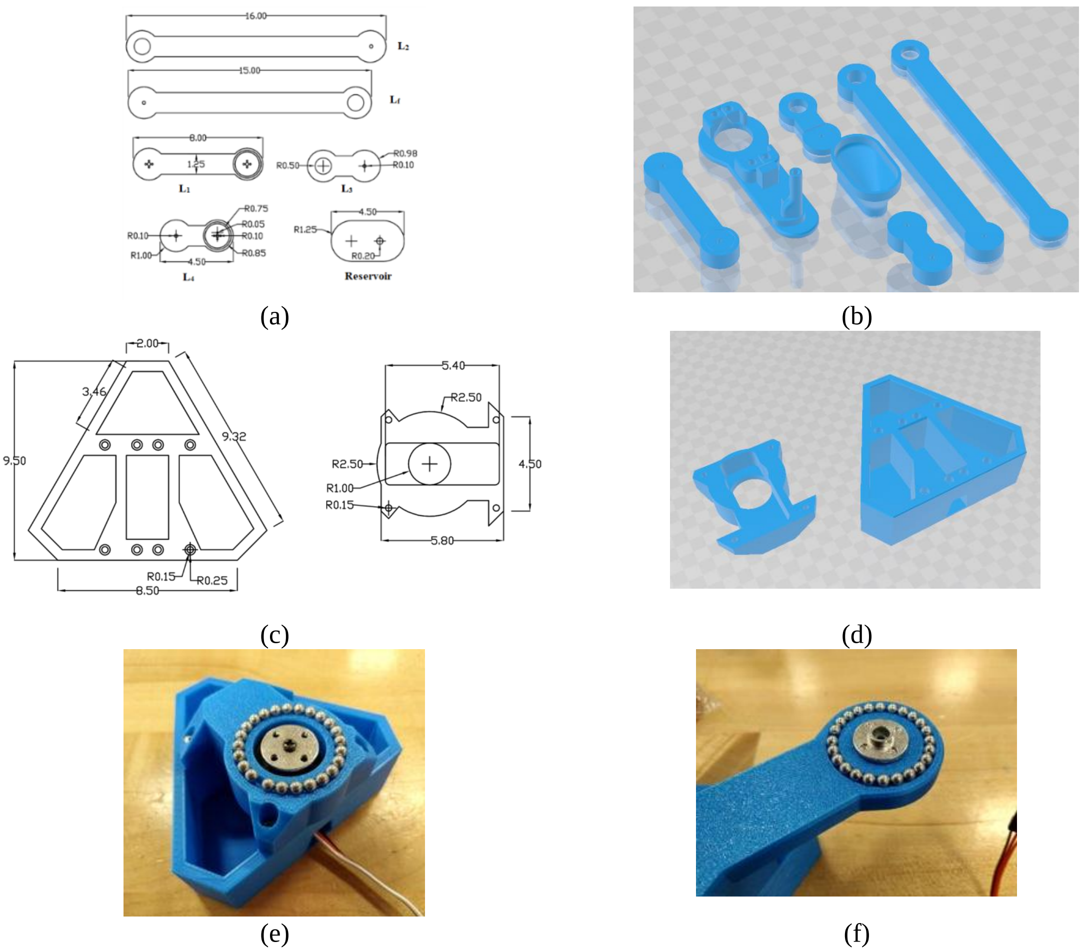
شکل ۱۰-a و ۱۰-c نقشه طراحی مورد استفاده در پژوهش حاضر و ۱۰-b و ۱۰-d نقشه ارسال‌شده به پرینتر سه‌بعدی جهت چاپ قطعات را نشان می‌دهد. بعد از چاپ قطعات و قرار دادن اجزا اتصال در محل مورد نظر، جرم بازوهای L_1، L_2، L_3، L_4 و L_f به‌ترتیب ۰/۱۴، ۰/۲۷، ۰/۸۳، ۰/۸۷ و ۰/۲۵ کیلوگرم گردید. در ضمن دو شیار (روی پایه و بازوی چرخنده) به‌منظور قرار دادن بلبرینگ ایجاد گردید؛ اما به‌منظور کاهش وزن سامانه از گوی‌های فلزی با ابعاد ۰/۴۵ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱۰-e و ۱۰-f). شایان ذکر است که مخزن سامانه کارنده توسط کاربر پر می‌گردید و در حالت کاملا پر، در حدود ۴± ۵۷ عدد بذر را در خود جای می‌داد. البته امکان تغییر در طراحی و ساخت مخزنی با ابعاد بزرگ‌تر نیز به‌راحتی امکان‌پذیر است.



(a) (b) (c)

شکل ۹– مدل‌سازی a) سرعت؛ b) شتاب؛ c) گشتاور محرک بازوی کارنده CF

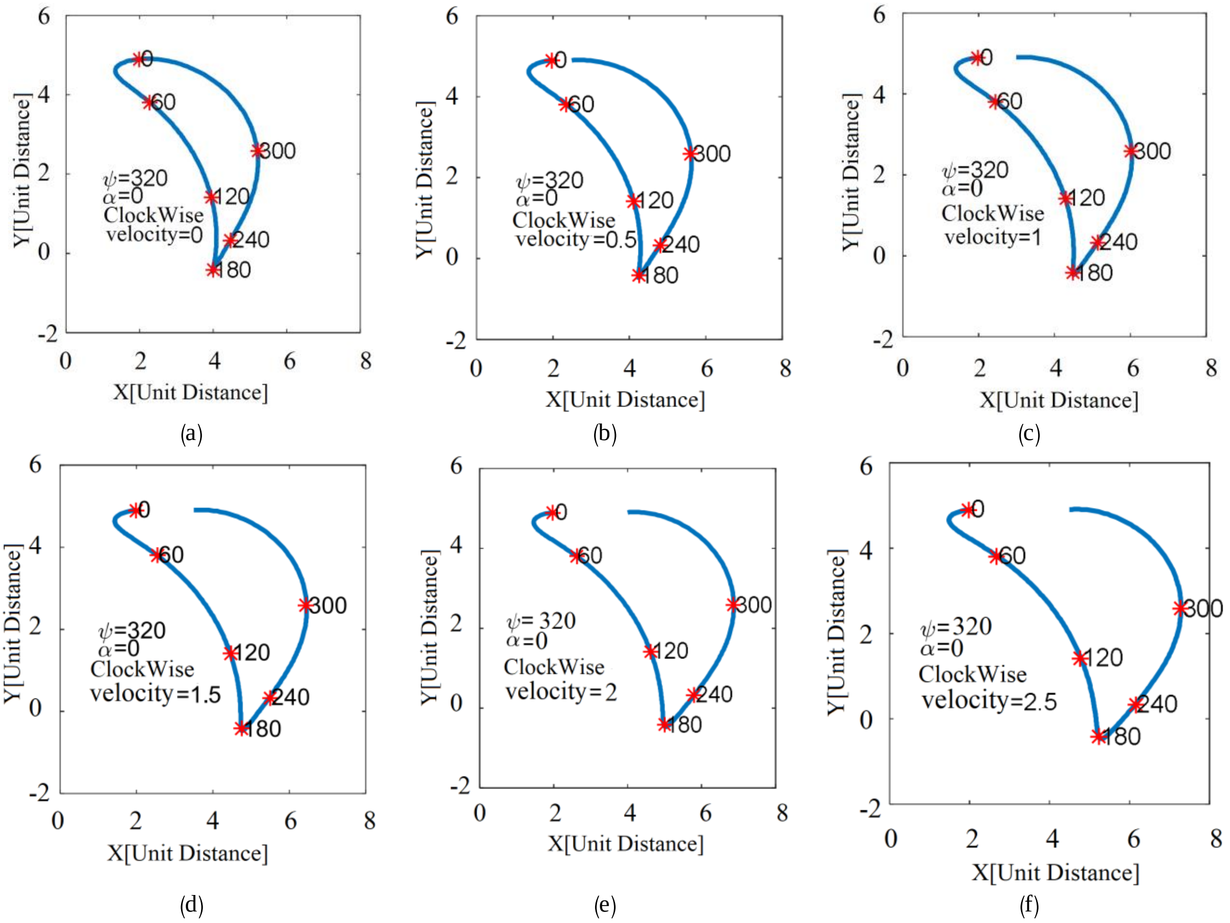
Fig.9. Modeling of CF planter linkage; a) Velocity; b) Acceleration; c) Torque



شکل ۱۰– نقشه اجزای مکانیکی سامانه کارنده؛ a) نقشه طراحی بازوها و مخزن؛ b) نقشه stl[1] بازوها و مخزن به‌منظور ارسال به چاپگر سه‌بعدی؛ c) نقشه طراحی پایه و نگهدارنده موتور؛ d) نقشه stl پایه و نگهدارنده موتور؛ e) محل قرارگیری گوی‌های فلزی در پایه؛ f) محل قرارگیری گوی‌های فلزی در بازو

Fig.10. Mechanical parts drawing; a) arms and reservoir drawing; b) stl drawing of arms and reservoir for 3D printing; c) base and motor holder; d) stl drawing of base and motor holder for 3D printing; e) ball location in based; f) ball location in arm

1- Standard Tessellation Language



شکل ۱۱- مدل‌سازی اثر سرعت حرکت تسمه نقاله بر قرارگیری بازوی CF: سرعت حرکت تسمه نقاله a) ۰؛ b) ۰/۵؛ c) ۱؛ d) ۱/۵؛ e) ۲؛ f) ۲/۵ واحد بر ثانیه

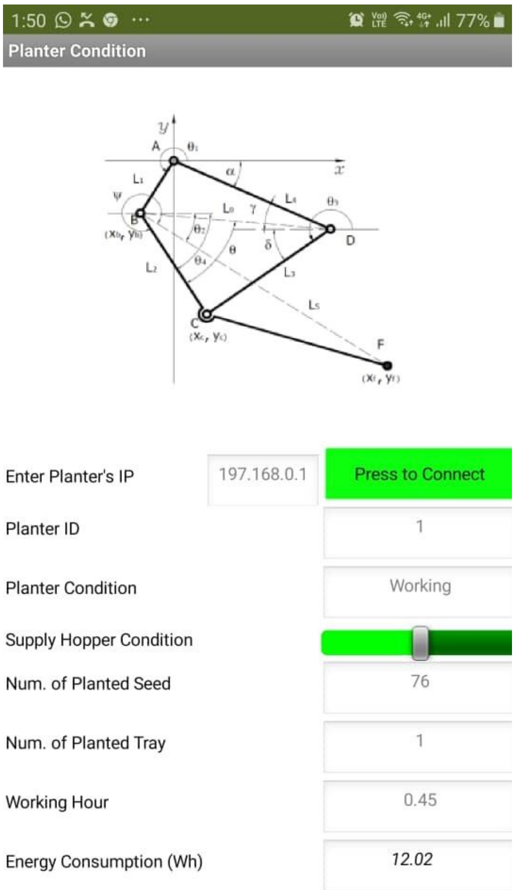
Fig.11. Modeling of the effect of conveyor belt speed on CF arm position: conveyor belt speed a) 0; b) 0.5; c) 1; d) 1.5; e) 2; f) 2.5 unit per second

به‌علاوه در مدل‌سازی صورت‌گرفته در نرم‌افزار MatLab 2021 امکان اعمال سرعت حرکت تسمه نقاله و بررسی اثر آن در مسیر کاشت نیز وجود دارد. این بدین معنی است که دستگاه هم امکان کاشت به‌صورت پیوسته و هم به‌صورت توقف/حرکت[1] را دارد. شکل ۱۱ اثر سرعت‌های مختلف (۰، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ واحد بر ثانیه) حرکت تسمه نقاله را بر موقعیت بازو کارنده نمایش می‌دهد.

ارزیابی بازوی کارنده

به‌منظور ارزیابی عملکرد سامانه تسمه نقاله، با ۲ سرعت ثابت ۵ و ۱۰ سانتی‌متر در ثانیه، سینی را به محل کاشت هدایت می‌نمود. در این مرحله از تعداد ۳۰۰۰ سلول مورد بررسی، شاخص‌های نکاشت و چندگانه کاشت به‌ترتیب ۰/۰۳ و ۸/۱۷ درصد به‌دست آمد. در ضمن متوسط زمان کاشت یک سینی ۵۰ سلولی بعد از قرارگیری در محل تصویربرداری، وابسته به نحوه قرارگیری (دوری و نزدیکی به کارنده) بین ۴۶-۳۳ ثانیه شد که این عدد برای یک فرد در سه تکرار ۲±۲۴ ثانیه گردید. لذا ظرفیت کاشت سامانه کارنده در سرعت ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه (به‌صورت متوسط در ۶ ساعت) به‌ترتیب ۲۰۵۸ و ۲۹۶۳ سلول در ساعت بود. در ضمن میزان انرژی مصرفی ۲۵/۵۶ وات‌ساعت و انرژی مصرفی برای کاشت یک بذر به‌طور متوسط ۰/۵۳ وات‌ساعت به‌دست آمد. در پژوهشی شاخص‌های نکاشت و چندگانه کاشت برای کارنده نیوماتیکی یونیسم و بذر سورگوم به‌ترتیب ۳/۱۷ و ۶/۳۴ درصد به‌دست آمد. انرژی مصرفی دستگاه فوق‌الذکر برای کاشت یک مسیر ۳۰ متری برای یک ردیف کارنده ۲۵۹۰ وات‌ساعت گزارش گردید؛ این مقدار از انرژی در حدود ۵۹ وات‌ساعت برای یک عدد بذر در این مسیر کاشت می‌باشد (Abdolahzare & Abdanan Mehdizadeh, 2018b). شکل ۱۲ صفحه نرم‌افزار توسعه‌یافته برای تلفن همراه هوشمند به‌منظور پایش شرایط کارنده را نمایش می‌دهد.

1- Start/stop



شکل ۱۲– صفحه نرم‌افزار توسعه‌یافته برای تلفن هوشمند به‌منظور پایش شرایط کارنده

Fig.12. Software page developed for smartphones to monitor the planter's condition

نحوه عملکرد نرم‌افزار به این صورت است که ابتدا کاربر، آی‌پی مربوط به سامانه کارنده را وارد نموده و کلید اتصال را لمس می‌کند. به محض اتصال رنگ کلید سبز شده و شماره کارنده[1] نمایش داده می‌شود. این قسمت زمانی کاربرد دارد که تعداد زیادی کارنده وجود داشته باشد. از جمله اطلاعات دیگری که در برنامه گوشی هوشمند نمایش داده می‌شود وضعیت کاری کارنده، تعداد سینی‌ها و بذرهای کاشته شده، پر و خالی بودن مخزن کارنده، ساعات کاری و میزان انرژی مصرفی است.

در پژوهشی به طراحی و ساخت یک ربات بذرکار دقیق برای سینی‌های کاشت پرداخته شد. در این پژوهش ظرفیت نامی این بذرکار بین ۱۷۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰ سلول در ساعت گزارش گردید (Gezavati *et al.*, 2014). این در حالی است که سامانه طراحی‌شده در این تحقیق به ابعاد سینی نشاء و چگونگی قرارگیری آن‌ها وابسته بود و درصورتی‌که نوع سینی نشاء تغییر کند سامانه کاشت نیز می‌بایست تغییر کند؛ حال آن‌که سامانه کارنده در پژوهش حاضر با توجه به تشخیص محل کشت به‌وسیله سامانه بینایی ماشین به محل قرارگیری و ابعاد سینی نشاء وابسته نمی‌باشد.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر یک سامانه کاشت بذر در سینی نشاء براساس مدل‌سازی دینامیکی طراحی، ساخته و ارزیابی گردید. در سامانه توسعه‌یافته تشخیص محل کاشت به‌وسیله پردازش تصویر صورت پذیرفت. به‌منظور ارزیابی سامانه کاشت دو سطح سرعت برای تمسه نقاله ۵ و ۱۰ سانتی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد که ظرفیت این بذرکار به‌ترتیب ۳۵۷۹ تا ۴۶۱۳ سلول در ساعت به‌دست آمد. از طرف دیگر، شاخص‌های نکاشت و چندگانه کاشت در ۳۰۰۰ سلول نیز به‌ترتیب ۰/۰۳ و ۸/۱۷ درصد گردید که نشان از عملکرد قابل‌قبول این سامانه دارد. در ضمن میزان انرژی مصرفی ۲۵/۵۶ وات‌ساعت، سامانه را به جایگزینی مناسب برای بذرکاری دستی تبدیل می‌نماید.

1- Planter ID

از دیگر مزایای این سامانه امکان پایش پارامترهای آن توسط کاربر و از طریق نرم‌افزار طراحی‌شده برای گوشی هوشمند است. از جمله اطلاعاتی که در برنامه گوشی هوشمند نمایش داده می‌شود وضعیت کاری کارنده، تعداد سینی‌ها و بذرهای کاشته شده، پر و خالی بودن مخزن کارنده، ساعات کاری و میزان انرژی مصرفی است.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله نویسنده از حمایت مالی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان قدردانی می‌نماید.

References

1. Abdolahzare, Z., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2018a). Real time laboratory and field monitoring of the effect of the operational parameters on seed falling speed and trajectory of pneumatic planter. *Computers and Electronics in Agriculture, 145*, 187-198. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.001
2. Abdolahzare, Z., & Abdanan Mehdizadeh, S. (2018b). Nonlinear mathematical modeling of seed spacing uniformity of a pneumatic planter using genetic programming and image processing. *Neural Computing and Applications*, *29*(2), 363-375. https://doi.org/10.1007/s00521-016-2450-1
3. Anonymous. (2007). Allegro MicroSystems, Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor, ACS712 datasheet.
4. Biancardi, E., McGrath, J. M., William Panella, L., Lewellen, R.T. & Stevanato, P. (2010). *Sugar Beet*, Springer Publishers, NY. pp. 173-219. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92765-7_6
5. Cao, J. (2019). Current situation and countermeasures of vegetable industry. *Seed Science and Technology, 37*(3), 18-21.
6. Chapra, S. C. (2012). Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists, McGraw-Hill Publishers, NY., pp. 100-112.
7. Chen, L., Ma, X., Wang, C., Li, H., Li, Z., Chen, X., & Chen, T. (2020). Design and test of soft-pot-tray automatic embedding system for light-economical pot seedling nursery machine. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 13*(1), 91-100. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20201301.4726
8. Food and Agriculture Organization (FAO). (2018). Retrieved from: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC
9. Gaikwad, B. B., & Sirohi, N.P.S. (2008). Design of a low-cost pneumatic seeder for nursery plug trays. *Biosystems Engineering, 99*(3), 322-329. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.10.017
10. Gezavati, J., Mohammad Zamani, D., Abbasgolipour, M., Mohammadi Alasti, B., & Ranji, A. (2014). Preliminary design, construction and evaluation of robot of tomato seed planting for the trays of greenhouse. *Journal of Agricultural Machinery, 5*(2), 242-250. (in Persian). https://doi.org/10.22067/jam.v5i2.28257
11. González Mendoza, J. M., Palacios Montufar, C., & Flores Campos, J. A. (2013). Analytical synthesis for four-bar mechanisms used in a pseudo-equatorial solar tracker. *Ingeniería e Investigación*, *33*(3), 55-60. https://doi.org/10.15446/ing.investig.v33n3.41045.
12. Jin, X., Yuan, Y., Ji, J., Zhao, K., Li, M., & Chen, K. (2020). Design and implementation of anti-leakage planting system for transplanting machine based on fuzzy information. *Computers and Electronics in Agriculture*, *169*, 105204. https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105204
13. Keyvanlo, A. L., & Armin, M. (2017). The effect of seedlings age and date of transfer on quantitative and qualitative characteristics of sugar beet. *Iranian Journal of Field Crop Science*, *48*(1), 291-301. https://doi.org/10.22059/ijfcs.2017.131207.653935
14. Li-zhang, X. U., & Yao-ming, L. I. (2007). Design and simulation of the forest trees potter. *Journal of Machinery Design & Manufacture*, *3*(2), 24-25.
15. Nadafzadeh, M., Abdanan Mehdizadeh, S., & Soltanikazemi, M. (2018). Development of computer vision system to predict peroxidase and polyphenol oxidase enzymes to evaluate the process of banana peel browning using genetic programming modeling. *Scientia Horticulturae, 231*(5), 201-209. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.047
16. Nasri, R., Kashani, A., Sadeghian Motahar, Y., & Habibi, D. (2011). Quantitative and qualitative characteristics of fall sugar beet in direct cultivation and paper pot transplanting under saline soils of Ahvaz. *Agronomy and Plant Breeding Journal, 7*(7), 25-40. (In Persian).
17. Nematinia, E., & Mehdizadeh, S. A. (2018). Assessment of egg freshness by prediction of Haugh unit and albumen pH using an artificial neural network. *Journal of Food Measurement and Characterization, 12*(3), 1449-1459. https://doi.org/10.1007/s11694-018-9760-1
18. Rosli, M. F. M., Mahadi, M. R., Misri, M. A., & Wayayok, A. (2016). Initial design of an automated system for paddy seedling placement in a germination tray. *Journal Technology, 78*(1-2): 119-123. https://doi.org/10.11113/jt.v78.7283
19. Si, H. P., Sun, L., Jie, C., Wu, J. H., & Lin, K. Y. (2013). Summary of the developing status of greenhouse tray seeder and seed metering device. *In Applied Mechanics and Materials*, *387*(8), 271-279.

https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.387.271
20. Tian, L., Xing, P. G., & Zhang, L. (2017). Design of automatic transplant device for hole disc seedlings based on PLC and photoelectric sensing control. *Journal of Agriculture Machinery Research, 39*(7), 125-129.
21. Waldron, K. J., Kinzel, G. L., & Agrawal, S. K. (2016). *Kinematics, dynamics, and design of machinery*. John Wiley & Sons Publishers. pp. 80-92. https://worldcat.org/en/title/930875622
22. Wang, J., Fu, Z., Zhang, B., Yang, F., Zhang, L., & Shi, B. (2018). Decomposition of influencing factors and its spatial-temporal characteristics of vegetable production: A case study of China. *Information Processing in Agriculture, 5*(4), 477-489. https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.06.004
23. Wang, X., & Feng, Q. C. (2013). Design and Simulation for Key Components of Robotic Flower-Seedling Transplanter. *Advanced Materials Research*, *680*(11), 387-391. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.680.387
24. Yun, Zh., Xiong, Zh., Weiwei, Z., & Li, D. (2011). Modern design theory and method of rice transplanter. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, *3*(2), 013.
25. Yang, Q., Huang, G., Shi, X., He, M., Ahmad, I., Zhao, X., & Addy, M. (2020). Design of a control system for a mini-automatic transplanting machine of plug seedling. *Computers and Electronics in Agriculture*, *169*, 105226. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105226
26. Yang2018, Q., Xu, L., Shi, X., Ibrar, A., Mao, H., Hu, J., & Han, L. (2018). Design of seedlings separation device with reciprocating movement seedling cups and its controlling system of the full-automatic plug seedling transplanter. *Computers and Electronics in Agriculture, 147*, 131-145. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.004